

## ОТЗЫВ

официального оппонента Лубсандоржиева Баярто Константиновича, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), на диссертацию Щепетова Александра Леонидовича «Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация А.Л. Щепетова посвящена глубокой модернизации экспериментального комплекса Тянь-Шаньской высокогорной станции Физического института им.П.Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН).

**Актуальность** проводившихся на станции модернизационных работ обусловлена рядом обстоятельств. Во-первых, вплоть до настоящего времени остаются непонятными многие особенности космических лучей, принадлежащих к энергетическому диапазону 0,1-100 ПэВ. Ряд параметров, полученных как для первичного потока таких частиц, так и для реакций, вызываемых их взаимодействиями в веществе, не удастся непротиворечиво объяснить, исходя из выводов, основанных на Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц и/или общепринятых предположениях об источниках и процессах ускорения космических лучей. Во-вторых, на современном этапе развития науки большое внимание привлекает вопрос о влиянии, которую взаимодействия частиц космических лучей высокой энергии с веществом земных оболочек оказывают на ряд геофизических процессов, и прежде всего на явления, связанные с физикой атмосферного электричества. Наконец, долговременные прецизионные измерения глобальной интенсивности космических лучей представляют собой эффективный инструмент для получения информации о явлениях, связанных с физикой Солнца, уровнем солнечной активности, структурой гелиосферы, а также для прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на больших высотах в атмосфере, прогноза сейсмической активности и других прикладных задач. По всем перечисленным направлениям на Тянь-Шаньской высокогорной станции было запланировано проведение экспериментальных исследований, создание измерительной аппаратуры, методов математической обработки и программного обеспечения для которых и составляют **предмет** рассматриваемой диссертационной работы.

Таким образом, основная **цель** представленной диссертации заключалась в подготовке к проведению на Тянь-Шаньской станции ФИАН ряда экспериментов, подчиненных единой логике исследования - всестороннему изучению параметров взаимодействия частиц космических лучей ПэВ-ных энергий и тех эффектов, которые такие взаимодействия оказывают на ряд геофизических явлений. Важная особенность вновь созданных на Тянь-Шаньской станции установок заключается в том, что в своей совокупности они образуют единый многофункциональный экспериментальный комплекс, который, благодаря своему высокогорному расположению, развитой



инфраструктуре и набору применяемых детекторов оказывается уникальным в мировом масштабе.

### **Общая характеристика работы**

Во введении к диссертации обоснована актуальность работы, сформулированы конкретные цели и задачи проводившихся исследований, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, а также личный вклад, внесенный автором в их достижение. Основное содержание диссертационной работы изложено в шести главах.

**Первая глава** диссертации представляет собой расширенное введение, в котором последовательно рассматривается ряд физических задач, которые предполагалось решать с помощью многофункционального экспериментального комплекса Тянь-Шаньской станции: исследование частиц космических лучей, принадлежащих к энергетическому диапазону  $E_0=(10^{14}-10^{17})$  эВ, в том числе в области излома первичного спектра при  $E_0 \sim 3$  ПэВ, для которого во взаимодействиях таких частиц с веществом наблюдается ряд аномальных явлений, недостаточно понятных с точки зрения теории, основанной на современных ускорительных данных. Помимо этого, разнообразные детекторы установки нового экспериментального комплекса Тянь-Шаньской станции должны обеспечить непрерывный мониторинг интенсивности космических лучей и радиационного фона в окружающей среде. Запланированные для проведения на Тянь-Шаньской станции исследования геофизической направленности представляют собой регистрацию излучений различного типа, сопровождающих развитие молниевых разрядов, в том числе и в корреляции с прохождением энергичных частиц космических лучей для изучения их роли в эффектах атмосферного электричества, и регистрацию сигналов сейсмического происхождения от находящегося в окрестностях станции глубинного литосферного разлома. Завершается первая глава обзором современного состояния научного комплекса детекторов Тянь-Шаньской станции и личного вклада, внесенного автором диссертации в развитие каждой из составляющих его экспериментальных установок.

Во **второй главе** рассматривается центральная подсистема экспериментального комплекса — так называемая ливневая установка, то есть система пространственно распределенных детекторов заряженных частиц, предназначенная для регистрации широких атмосферных ливней. Здесь представлены выполненные автором диссертации разработки новой электронной аппаратуры для этой установки, математических методов и программного обеспечения, посредством которого реализуется управление ливневой установкой в процессе измерений, сбор и обработка поступающих данных, долговременное хранение этой информации и доступ к ней для анализа со стороны сторонних научных групп. Корректность вновь разработанных методик и алгоритмов продемонстрирована путем сравнения полученных с их помощью результатов с известными результатами прежних измерений. В ходе обсуждения всех связанных с ливневой установкой разработок постоянно подчеркивается их адекватность поставленной задаче — получению новых, недоступных в прежних экспериментах, сведений о характеристиках взаимодействия частиц космических лучей ПэВ-ных энергий.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию частиц ядерно-активной



компоненты космических лучей. Посредством моделирования, проводившегося на основе пакета Geant4, в этой главе обоснована возможность применения для этой цели нейтронного супермонитора 18НМ64, который входит в состав экспериментального комплекса Тянь-Шаньской станции. Далее представлено необходимое для проведения таких экспериментов аппаратное и программное обеспечение, которое разрабатывалось автором на основе современной микропроцессорной техники. Отмечено, что вновь созданные программно-аппаратные средства предоставляют возможность, одновременно с изучением характеристик вызываемых частицами космических лучей ядерных взаимодействий, проводить на мониторе долговременные прецизионные измерения глобальной интенсивности космических лучей, результаты которых необходимы для задач геофизической тематики.

В **четвертой главе** на основе модельных расчетов рассмотрена возможность применения нейтронной методики и вновь разработанных для детекторов Тянь-Шаньской станции аппаратных и программных средств регистрации тепловых нейтронов и гамма-квантов, которые образуются в окружающей среде под воздействием адронной компоненты космических лучей. Показано, что целенаправленное детектирование таких вторичных частиц представляет собой новый, ранее не использовавшийся метод для эффективного исследования адронных взаимодействий в космических лучах ПэВ-ных энергий. Эффективность такого подхода иллюстрируется новыми данными относительно запаздывающего сопровождения широких атмосферных ливней нейтронами и гамма-лучами низкой энергии, которые были получены во время тестовой эксплуатации детекторов Тянь-Шаньской станции в 2015–2019 годах.

В **пятой главе** разработанные на Тянь-Шаньской станции методы использования нейтронных детекторов и анализа поступающей от них информации применяются для регистрации нейтронов, которые образуются под воздействием проникающей компоненты космических лучей в толстом слое поглотителя, расположенного над подземным нейтронным детектором станции. Такой, впервые примененный подход к изучению мюонов высокой энергии, позволил получить ряд новых результатов относительно мюонного сопровождения широких атмосферных ливней.

**Шестая глава** диссертации посвящена экспериментам геофизической направленности. Здесь представлены расчетные результаты для потоков излучений различного типа, которые генерируются при развитии электронно-фотонных лавин в электрическом поле грозового облака. В расчете использовалась модель таких лавин, разработанная автором на основе пакета Geant4 для конкретных условий Тянь-Шаньской высокогорной станции. Исходя из этих результатов, по инициативе автора диссертации в окрестностях станции были развернуты высотные пункты размещения детекторов, которые во время гроз оказывались в глубине грозových облаков, и разработана аппаратура, программное обеспечение и специальная методика проведения измерений в таких условиях. Детекторы высотных пунктов использовались для непосредственной регистрации потоков энергичных излучений — ускоренных электронов и гамма-квантов, — в непосредственной близости (десятки метров) к пространственной области их генерации в канале молниевых разрядов. В этих экспериментах были получены уникальные данные относительно временного и энергетического распределений излучений от молниевых разрядов в событиях, относящихся к различным типам грозовой активности, синхронные записи излучения



молний в радио-, оптическом и гамма-диапазонах электромагнитного спектра, данными по молниевым событиям с различными особенностями в спектре излучений. Подобная экспериментальная информация необходима для разработки современных моделей развития молнии. Разработанные для этих измерений аппаратура и программное обеспечение применялись также в эксперименте по регистрации акустических сигналов сейсмического происхождения, результаты которого представляют интерес для задач, связанных с долговременным прогнозированием уровня сейсмической активности в окружающем Тянь-Шаньскую станцию сейсмоопасном регионе.

В **заключении** к диссертации подводятся итоги проделанной в ходе ее выполнения исследовательской работы.

**Научная новизна и значимость** работы заключаются в том, что в результате ее выполнения на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН к настоящему времени был создан, впервые в условиях высокогорья, уникальный многофункциональный научный комплекс, который не имеет мировых аналогов по своей информативности, высокогорному расположению, разнообразию используемых детекторов, и который позволяет проводить взаимосвязанные исследования в различных областях экспериментальной физики: физики космических лучей и элементарных частиц, астрофизике, атмосферной физике высоких энергий, геофизики и сейсмологии. К настоящему времени детекторы нового высокогорного комплекса уже позволили подробно исследовать пространственную структуру широких атмосферных ливней с первичной энергией вплоть до 100 ПэВ, в том числе в их центральной области, что оставалось недостижимым в прежних экспериментах. Применение в составе комплекса нейтронных и гамма-детекторов с низким энергетическим порогом открыло возможность изучать ранее не регистрировавшиеся потоки нейтронов и гамма-квантов низкой энергии, что качественно улучшает информативность данных об адронной компоненте широких атмосферных ливней. Использование подземных детекторов для регистрации нейтронов, которые рождаются во взаимодействиях энергичных мюонов, позволило обнаружить ранее неизвестные особенности в поведении мюонной компоненты космических лучей. По направлениям геофизической тематики, на Тянь-Шаньской станции, впервые для высокогорных условий, были созданы стационарные высотные пункты размещения детекторов, применявшиеся для эффективной регистрации излучений, сопровождающих молниевые разряды, вблизи пространственной области их развития, и была разработана практическая методика проведения таких измерений в грозовых облаках. Был разработан новый метод для оперативного тестирования текущего состояния земной коры в области глубинных разломов, основанный на регистрации акустических сигналов сейсмического происхождения. Вся информация, полученная в ходе проводимых на Тянь-Шаньской станции экспериментов, представлена в общей базе данных с открытым доступом, что делает возможной ее независимую обработку участниками сторонних научных групп.

Автор представленной диссертационной работы внес существенный **личный вклад** в развитие экспериментального комплекса Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН: постановку научных задач, создание соответствующей аппаратуры и разработку современных методик проведения измерений. В разработках и создании ряда подсистем



экспериментального комплекса, таких, как нейтронные детекторы, высотные детекторы для регистрации излучений от молнии, детекторы сейсмических сигналов, информационный комплекс Тянь-Шаньской станции, вклад автора был определяющим.

Есть в работе и незначительные замечания:

1. На странице 18 при описании физического процесса, приводящего к пределу (“обрезанию” спектра космических лучей ультравысоких энергий) Зацепина-Кузьмина-Грейзена, упоминается “обратный фотоэффект”. С этим сложно согласиться, взаимодействие космических лучей с энергиями более  $\sim 5 \times 10^{19}$  эВ с фотонами реликтового излучения, все-таки, нельзя никак назвать обратным фотоэффектом.
2. На этой же странице приводятся ссылки [1, 43] на открытие так называемого “колена” в спектре космических лучей при энергиях  $\sim 3 \times 10^{15}$  эВ, сделанное Г.Б. Христиансенем и Г.В. Куликовым. Вторая ссылка [43] является переводным вариантом оригинальной статьи [1].
3. На странице 23 установка Ice-ТОР упоминается наряду с установками Auger (РАО) и Telescope Array (ТА) как установка, нацеленная на исследования космических лучей предельно высоких энергий “вплоть до  $10^{20}$  эВ”. В действительности, геометрический размер установки Ice-Cube ( $\sim 0,36$  км<sup>2</sup>) не позволяет работать в этой области энергий, сравните с размером РАО -  $\sim 3000$  км<sup>2</sup>.
4. На странице 258 приводится квантовая эффективность  $\approx 20\%$  фотоумножителя Hamamatsu R1463 “для ультрафиолетовых лучей”. Указанная величина является типичным максимальным значением квантовой эффективности данного фотоумножителя, который достигается на длинах волн 340-350 нм.
5. Как и в любой большой работе в диссертации есть опечатки, неудачные стилистические обороты, жаргонизмы и т.д., например, на странице 20 упоминается установка “KASCADE-GRAND” вместо “KASCADE-GRANDE”, дважды делается ссылка на одну и ту же работу – ссылки [11] и [95]; размеры сцинтилляционной панели, приведенные на странице 60, не соответствуют размерам панели, показанным на рис.2.3 (страница 61).

Отмеченные выше несущественные замечания несколько не влияют на высокую оценку данной работы. Следует отметить огромный объем и высокое качество всех работ, сделанных диссертантом. Впечатляет размах исследований – это и физика космических лучей, физика атмосферы и геофизика, а также разносторонность деятельности автора – это и разработка и создание электронных систем, разработка и создание программного обеспечения для этих систем, численное моделирование установок, анализ данных и т.д. Сформулированные в диссертации выводы и положения не вызывают никаких сомнений. Они все **достоверны, обоснованы** и, несомненно, обладают **высокой научной ценностью**. Основные результаты своевременно опубликованы в хороших, высокорейтинговых журналах и докладывались автором на российских и международных конференциях. Диссертация является **законченной** научно-исследовательской работой на весьма актуальную тему. Полученные в диссертации результаты, несомненно, найдут применение в экспериментах астрофизики частиц, физике высоких энергиях, физике атмосферы, геофизике и т.д.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Работа **соответствует всем требованиям ВАК** “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее **автор, Щепетов Александр Леонидович, несомненно, заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Лубсандоржиев Баярто Константинович,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Отдела экспериментальной физики  
Лаборатории гамма-астрономии и  
реакторных нейтрино.

Тел.: Моб.: 8 (916) 148-38-48, раб.: 8 (499 )135-40-63  
Email: lubsand@rambler.ru

Б.К. Лубсандоржиев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук.  
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия октября, 7а

Подпись Б.К. Лубсандоржиева удостоверяю.

Заместитель директора ИЯИ РАН



А.В. Фещенко



## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе *Щепетова Александра Леонидовича* на тему «*Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции*», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

№		
1	<b>Фамилия Имя Отчество</b>	Лубсандоржиев Баярто Константинович
2	<b>Год рождения, гражданство</b>	1960, Российская Федерация
3	<b>Ученая степень, шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация</b>	Доктор физико-математических наук 01.04.01, Приборы и методы экспериментальной физики
4	<b>Ученое звание</b>	
5	<b>Академическое звание</b>	
<b>Место основной работы:</b>		
6	<b>Полное название организации</b>	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г.Москва
7	<b>Ведомственная принадлежность</b>	Российская академия наук
8	<b>Тип организации</b>	
9	<b>Занимаемая должность, подразделение</b>	Ведущий научный сотрудник Отдел экспериментальной физики
10	<b>Почтовый индекс, адрес</b>	117312, Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, д.7а
11	<b>Телефон</b>	8 4991354360
12	<b>Адрес электронной почты</b>	<a href="mailto:lubsand@rambler.ru">lubsand@rambler.ru</a>
<p style="text-align: center;"><b>Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. В.К.Lubsandorzhev. The Tunka experiment: from small “toy” experiment to multi-TeV gamma-ray observatory // Physics of Particles and Nuclei. 2015. Vol. 46. No.2. P.190-196.</li> <li>2. Y. Abe, T. Abraho, H. Almazan, ..., B.K Lubsandorzhev et al. Characterization of the spontaneous light emission of the PMTs used in Double Chooz experiment // 2016 JINST 11 P08001.</li> <li>3. В.К.Lubsandorzhev. Evolution of Ideas in Photon Detection // Physics of Particles and Nuclei. 2016. Vol.47. No.6. P.957-967.</li> <li>4. K. Freund, R. Falkenstein, P. Grabmayr, ....., B. Lubsandorzhev et al. , The Performance of the Muon Veto of the Gerda Experiment // EPJC 76:298 2016</li> <li>5. M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov, .. ..., B. Lubsandorzhev et al. Flux Modulations seen by the Muon Veto of the Gerda Experiment // Astroparticle Physics. 2016. V.84. P.29-35</li> <li>6. N. Budnev, I. Astapov, N. Barbashina, ... , B. Lubsandorzhev et al. The TAIGA experiment: From Cosmic Ray to Gamma-Ray Astronomy // Nuclear Instruments and Methods A. 2017. V.845. p.330</li> </ol>		

7. R.D. Monkhoev, N.M. Budnev, ..., B.K. Lubsandorzhev, et al. The Tunka-Grande experiment // 2017. JINST. 12. C06019.
8. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, ..., Б. К. Лубсандоржиев и др. Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики // Ядерная физика. 2017. Т.80. N.3. С.230-238.
9. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, ..., B. Lubsandorzhev et al. Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 02(2017)017.
10. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, ..., B. Lubsandorzhev et al. Novel event classification based on spectral analysis of scintillation waveforms in Double Chooz // 2018 JINST 13 no.01, P.01031.
11. R.U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, ....., B. Lubsandorzhev et al. Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in monocular mode // Astrophys. J. 2018. 865. N.1. P.74.
12. Л.Б.Безруков, В.П.Заварзина, И.С.Карпиков, А.С.Курлович, Б.К.Лубсандоржиев, А.К.Межох, В.П.Моргалюк, В.В.Синев. Интерпретация результатов измерения разности потенциалов в озере Байкал // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2019. Т.59. N.5. С.666-670
13. N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. al. TAIGA – A Hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2020. V.958. 162113.
14. N.M. Budnev, A. Chiavassa, O.A. Gress, ....., B.K. Lubsandorzhev et al. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // Astroparticle physics. 117 (2020) 102406.
15. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev, ....., B. Lubsandorzhev et al. Cherenkov EAS arrays in the Tunka astrophysical center: from Tunka-133 to the TAIGA gamma and cosmic ray hybrid detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2020. V.952. 161830.

  
 \_\_\_\_\_ /Лубсандоржиев Б.К./

Подпись Б.К. Лубсандоржиева удостоверяю.

Заместитель директора ИЯИ РАН



Г.И.Рубцов

« 23 » марта 2020 г.